

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.024

纤维表面改性对 PA66 / 玄武岩纤维复合材料性能影响

和晋川^{1,2},汪国庆^{1,2},于人同^{1,2},王爱民¹,廖建和^{1,2}

(1. 南海海洋资源利用国家重点实验室,海口 570228; 2. 海南大学材料科学与工程学院,海口 570228)

摘要:以 CO₂ 和缩水甘油醚为原料合成了环状碳酸酯,通过环状碳酸酯与偶联剂 KH-550 的氨基反应制备两种新型表面改性剂,与 KH-550 分别对玄武岩纤维 (BF) 进行改性,得到三种改性纤维 KBF, KBF-P, KBF-B。采用双螺杆挤出机共混制备了改性玄武岩纤维增强尼龙 66(PA66) 复合材料,考察其力学性能和吸水率;采用扫描电子显微镜、热同步分析仪对复合材料的微观结构和热稳定性进行研究。结果表明,与未改性的复合材料相比,纤维质量分数为 20% 的 PA66 / KBF-B 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、无缺口冲击强度分别提高了 5.5%, 5.9%, 25.5%; 随着 KBF-B 含量的增加, PA66 / KBF-B 复合材料的力学性能均得到提高,当 KBF-B 质量分数达到 40% 时, PA66 / KBF-B 的拉伸强度、弯曲强度、无缺口冲击强度比纯 PA66 提高了 161.1%, 148.7%, 112.7%, 且优于相同纤维质量分数的 PA66 / 玻璃纤维复合材料; PA66 / KBF-B 复合材料的饱和吸水率仅为 3.8% 且具有优良的热稳定性。KBF-B 表面粗糙,与 PA66 具有良好的相容性。

关键词: 尼龙 66; 玄武岩纤维; 高分子基复合材料; 偶联剂; 环状碳酸酯

中图分类号: TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0125-06

Effect of Fiber Surface Modification on the Performance of PA66 / Basalt Fiber Composite

He Jinchuan^{1,2}, Wang Guoqing^{1,2}, Yu Rentong^{1,2}, Wang Aimin¹, Liao Jianhe^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Haikou 570228, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Cyclic carbonate was synthesized using CO₂ and glycidyl ether as raw materials. Two novel surface modifiers were prepared by reacting the cyclic carbonate with the amino group of coupling agent KH-550. Three modified basalt fiber (BF) named as KBF, KBF-P and KBF-B were obtained by three modification agent (KH550 and the two synthesized products). Modified basalt fiber-reinforced nylon 66 (PA66) composites were prepared in a twin-screw extruder. Mechanical properties and water absorption behavior of the composites were investigated. Microstructure and thermal stability of the composites were evaluated by means of scanning electron microscope (SEM) and thermal synchronization analyzer. The results show that compared with the unmodified composite material, the tensile, flexural and unnotched impact strengths of PA66 / KBF-B can be increased by 5.5%, 5.9%, and 25.5% when the fiber mass fraction is 20% respectively. With the increase of KBF-B, the mechanical properties of PA66 / KBF-B tend to be improved gradually. When the mass fraction of KBF-B reaches 40%, the tensile, bending, the unnotched impact strength would be 161.1%, 148.7%, 112.7% higher than pure PA66, which is also better than the glass fiber reinforced composite with the same fiber mass fraction. The saturated water absorption of PA66 / KBF-B composite is only 3.8%. Thermal stability of this composite are super to the analogues. With the results of scanning electron microscopy (SEM), it can be found that the miscibility between KBF-B and PA66 is pretty good.

Keywords: nylon 66; basalt fiber; polymer matrix composite; coupling agent; cyclic carbonate

玄武岩纤维 (BF) 是玄武岩石料在 1450 ~ 1500 °C 熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而

成的连续纤维。它具有优良的力学性能、耐高温、耐腐蚀性等优点^[1-4],性价比高,被认为是一种新型的

通信作者:汪国庆,博士生导师,教授,主要从事防腐防污涂层、无机纤维材料改性等方面的研究 E-mail: wangguoqing@hainanu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-06

引用格式: 和晋川,汪国庆,于人同,等. 纤维表面改性对 PA66 / 玄武岩纤维复合材料性能影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 125-130.

He Jinchuan, Wang Guoqing, Yu Rentong, et al. Effect of fiber surface modification on the performance of PA66 / basalt fiber composite[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 125-130.

绿色环保工业材料^[5]。我国已将BF列为重点发展的四大纤维(碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯、BF)之一,其作为补强材料在建筑、桥梁、铁路等领域得到了广泛应用^[6]。

尼龙66(PA66)不仅具有高比强度、高刚性、耐磨性、耐热性、耐腐蚀等性能,还具有自润滑性和热塑性^[7-9],因而被广泛应用于化工、纺织、电子电气、汽车、机械、航空航天等领域^[10]。但是与金属相比,PA66尚存在强度与刚性较低,吸水性强导致的尺寸变形及力学性能下降等不足^[11]。为此,人们采用玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯等增强改性PA66以弥补PA66性能上的不足^[12-17]。目前采用BF改性PA66的相关报道较少,笔者基于环状碳酸酯和氨基生成非异氰酸酯聚氨酯的高效绿色反应,合成了新型表面改性剂改变BF的表面基团,实现其与PA66基体的良好结合,期望得到高强度、低吸水率且热稳定性优良的树脂基复合材料,满足工业生产的广泛需求^[18-19]。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66:A3K,德国巴斯夫公司;

BF:BFCS-13-6,四川谦宜复合材料有限公司;

玻璃纤维:ERS200-13-T635B,泰山玻璃纤维有限公司;

偶联剂:KH-550,上海麦克林生化科技有限公司;

聚丙二醇二缩水甘油醚(PPGDGE)、丁基缩水甘油醚(BGE):上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

微型反应釜:YZPR-25型,上海岩征仪器公司;

双螺杆挤出机:HT30型,南京橡塑机械厂;

注塑机:HMK880-F5型,宁波海明塑料机械有限公司;

伺服控制拉力试验机:AI-3000型,高特威尔检测仪器(青岛)有限公司;

摆锤式冲击试验机:BQ-JX-50型,苏州霸器精密仪器科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-3000N型,日本Hitachi公司;

同步热分析仪:STA 449 F5 Jupiter型,德国耐驰公司。

1.3 样品制备

(1) 环状碳酸酯的制备。

通过高温高压下CO₂和环氧基团的加成反应制备了环状碳酸酯^[20-23]。将PPGDGE, BGE分别和催化剂(甘油醚质量的10%)装入25 mL高压反应釜中。通CO₂ 5 min后,将反应混合物加热至130℃,在0.5 MPa CO₂ 压力下进行反应48 h,搅拌速率为300 r/min,得到改性剂分别为5CC-P和5CC-B。

(2) 氨基化BF的制备。

为了实验操作的方便,利用KH-550将BF表面活化羟基变为氨基,使环状碳酸酯能直接与纤维表面的氨基反应起到改性的作用。称取一定量玄武岩纤维和30%浓度的过氧化氢放于配备冷凝管的500 mL双口烧瓶中,搅拌状态下缓缓加入浓硫酸,过氧化氢与浓硫酸质量比为3:7,40℃反应1 h,再70℃反应12 h,静置冷却至室温后用去离子水洗涤并过滤,纯化操作4次以去除残留的过氧化氢和硫酸。烘箱80℃干燥12 h得到表面羟基活化后的BF。为降低KH-550的水解副反应^[24-25],将KH-550于质量7:3的无水乙醇/去离子水溶液中配制为1.0%的水解溶液。将适量表面羟基活化后BF加入到KH-550水解溶液中搅拌30 min,过滤并常温下静置24 h,最后在120℃真空干燥箱中干燥12 h得到产物氨基化BF(KBF)。

(3) 非异氰酸酯聚氨酯-BF杂化材料的制备。

通过氨基与环碳酸酯的开环反应得到非异氰酸酯聚氨酯-BF杂化材料。将KBF置入配备冷凝管的500 mL烧瓶中,5CC-P和5CC-B分别和无水乙醇以一定比例混合,并加入1%环状碳酸酯质量的三乙烯二胺作为催化剂^[26],搅拌30 s后倒入烧瓶在70℃下反应8 h,冷却至室温后经无水乙醇清洗三次和去离子水冲洗一次,即分别得到非异氰酸酯聚氨酯-BF杂化材料KBF-P与KBF-B。

(4) PA66/BF复合材料及PA66/玻璃纤维复合材料的制备。

将PA66在95℃烘箱中干燥3 h,取出后分别与纯BF, KBF, KBF-B, KBF-P等短切BF及润滑剂、抗氧剂等辅料按一定比例加入到高速混合机中,高速混合1 min后,用双螺杆挤出机挤出(玻璃纤维则在挤出时加入,挤出机加热段温度270~280℃,机头温度280℃)。物料挤出后经过水冷、干燥、切粒,将得到的粒料在120℃烘箱中干燥2 h后注塑成标准试样(注塑机料筒温度275~290℃,模具温度100℃),最终得PA66/BF, PA66/KBF, PA66/

KBF-P, PA66 / KBF-B 和 PA66 / 玻璃纤维 5 种复合材料样条。

1.4 测试与表征

拉伸性能按照 GB/T 1040.1-2006 测试;

弯曲性能按照 GB/T 9341-2008 测试;

冲击性能按照 GB/T 1043.1-2008 测试;

塑料吸水性按照 GB/T 1034-2008 测试;

SEM 形貌分析: 在 PA66 / BF 复合材料表面淬断喷金, 用 SEM 观察并拍照;

同步热分析: 取样品约 5 mg, 90℃ 干燥 2 h, 然后在空气气氛下, 以 10℃ / min 的升温速率从常温加热到 800℃, 记录样品的热重、动态扫描量热分析曲线;

由于短切 BF 的低密度及所在单位的设备性能和规模的限制, 研究高短切纤维含量的复合材料制备困难, 故测试和表征均采用纤维含量 20% 的复合材料。

2 结果与讨论

2.1 PA66 / BF 复合材料的力学性能

图 1 为 BF 质量分数为 20% 的 PA66 / BF 复合材料的力学性能。

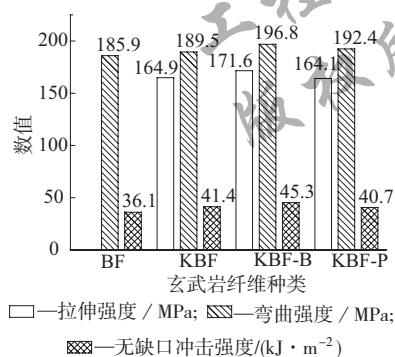
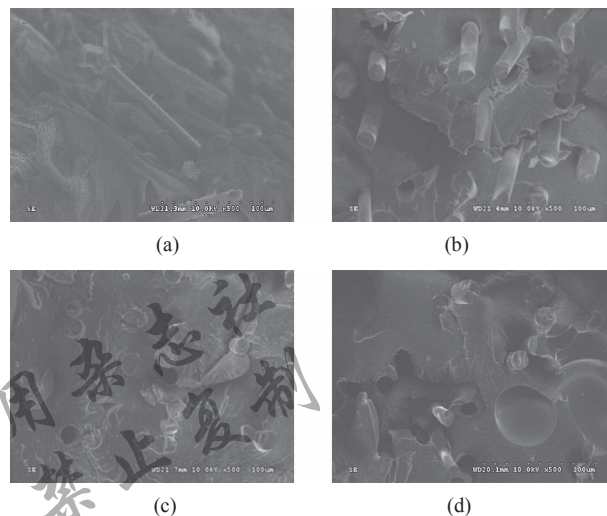


图 1 BF 质量分数 20% 的 PA66 / BF 复合材料的力学性能

由图 1 可见, KBF, KBF-B 和 KBF-P 相对于 BF 能更好地改善了复合材料的综合力学性能。PA66 / KBF-B 比 PA66 / BF 的拉伸强度、弯曲强度和无缺口冲击强度分别提高了 5.5%, 5.9% 和 25.5%。对于 PA66 / KBF 复合材料, 由于 KBF 中氨基与 PA66 的酰胺键之间存在较强的氢键相互作用, 基体相与增强相的相容性相对于 PA66 / BF 得到增强进而带来材料综合力学性能的提升。KBF-B 的氨基甲酸酯与 PA66 酰胺键间强烈的氢键相互作用带来相容性的提升, 而—NH—键的内旋转又使链柔性提高并改善复合材料的韧性。KBF-P 则由于双环碳酸酯与氨基的反应会使团聚变得严重。

图 2 为 BF 质量分数为 20% 的 PA66 / BF 复合材料的 SEM 照片。从图 2 可见, BF 纤维表面光滑, 未与 PA66 形成有效结合, 只是被 PA66 基体简单包覆其中; KBF 表面相对粗糙, 与 PA66 基体结合稍好; KBF-B 表面更加粗糙, 其与 PA66 界面结合处模糊, 体现出相容性的进一步改善。同等质量分数的 KBF-P 则不均匀地分散于 PA66 基体, 表面团聚现象严重。



a—PA66 / BF ; b—PA66 / KBF ;

c—PA66 / KBF-B ; d—PA66 / KBF-P

图 2 PA66 / BF 复合材料的断口形貌 SEM 照片

2.2 KBF-B 含量对 PA66 / KBF-B 复合材料力学性能的影响

由于 PA66 / KBF-B 复合材料获得了较好的力学性能, 故制备了不同 KBF-B 含量 (0%~40%) 的 PA66 复合材料, 研究了 KBF-B 含量变化对 PA66 / KBF-B 复合材料力学性能的影响。图 3~图 5 分别示出不同含量的 KBF-B 的 PA66 / KBF-B 复合材料的拉伸、弯曲和无缺口冲击强度。从图 3 可见, 随着 KBF-B 含量的增加, PA66 / KBF-B 的拉伸强度随之增加。当 KBF-B 质量分数达到 40% 时, 复合材料的拉伸强度达到了 224.8 MPa, 比纯 PA66 提高了 161.1%。

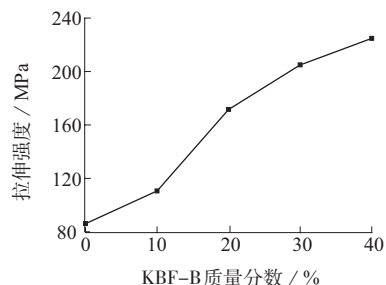


图 3 不同 KBF-B 含量的 PA66 / KBF-B 复合材料的拉伸强度

由图4可知,PA66/KBF-B的弯曲强度随KBF-B含量的增加呈上升趋势。当KBF-B质量分数达到40%时,复合材料的弯曲强度达到281.5 MPa,较纯PA66提高148.7%。

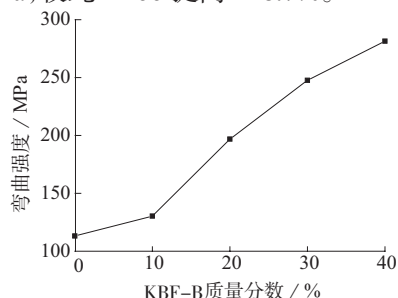


图4 不同KBF-B含量的PA66/KBF-B复合材料的弯曲强度

由图5可见,随着KBF-B含量增加,PA66/KBF-B的冲击强度随之提高。当KBF-B质量分数达到40%时,PA66/KBF-B的冲击强度达到55.3 kJ/m²,比纯PA66提高了112.7%。

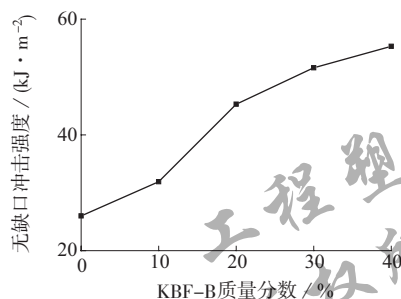


图5 不同KBF-B含量的PA66/KBF-B复合材料无缺口冲击强度

综上所述,随着KBF-B含量的增加,PA66/KBF-B的拉伸强度、弯曲强度、无缺口冲击强度都随之提高,这是由于KBF-B与PA66基体有效结合,并起到了骨架增强的作用。

2.3 PA66/KBF-B与PA66/玻璃纤维的力学性能对比

表1是KBF-B质量分数20%时,PA66/KBF-B和PA66/玻璃纤维复合材料的力学性能。

表1 纤维质量分数20%时PA66/KBF-B和PA66/玻璃纤维的力学性能

项目	纤维种类	
	KBF-B	玻璃纤维
拉伸强度 / MPa	171.6	154.2
断裂伸长率 / %	19.4	22.1
弯曲强度 / MPa	196.8	180.4
无缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	45.3	32.5

从表1可见,除断裂伸长率略有下降,PA66/KBF-B的力学性能均优于PA66/玻璃纤维。这是因为KBF-B的拉伸强度与拉伸弹性模量优于玻璃纤维。可见,KBF-B相对于玻璃纤维在复合材料中

能更好地起到骨架增强作用。

2.4 PA66/BF复合材料吸水率

PA66/BF复合材料的吸水率由公式(1)^[27]计算可得。使用分析天平分别测量了复合材料样条浸泡前的质量(m_1),浸泡后的质量(m_2),进而计算出各浸泡时间段样条的吸水率(W_p)。

$$W_p = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

PA66/BF复合材料的吸水率如图6所示。PA66/BF复合材料的吸水率在前快速期快速增长,然后进入较稳定的状态,最终达到平衡状态。PA66/BF, PA66/KBF, PA66/KBF-P 3种复合材料都在48 h之后才逐渐达到吸水平衡状态,其饱和吸水率分别约为5.1%,5.8%,4.7%;而PA66/KBF-B在24 h后就已经逐渐达到吸水平衡状态,其饱和吸水率仅约3.8%。较好地改善了PA66的吸水率。

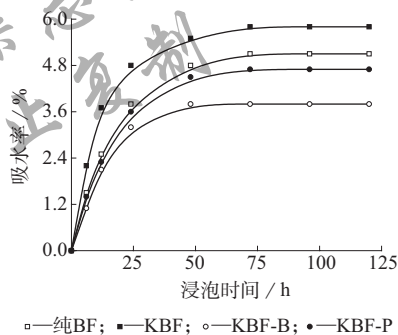


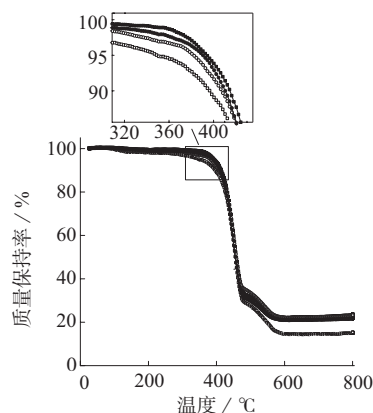
图6 PA66/BF复合材料的吸水率

2.5 PA66/BF复合材料的热学分析

纤维含量为20%的复合材料的热失重(TG)曲线、动态扫描量热(DSC)曲线如图7和图8所示, TG数据列于表2。

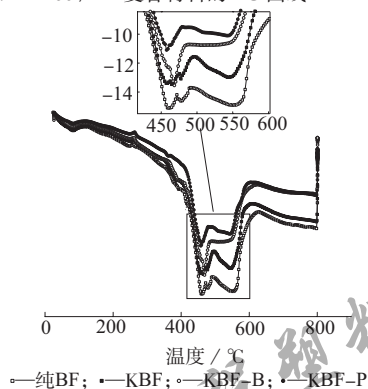
从图7和表2可以看出,相比于BF的PA66复合材料, KBF, KBF-B, KBF-P在失重5%,10%,50%时的失重温度(分别记为 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$)都更高,表明改性后的材料具有更高的热稳定性。其中,PA66/KBF的 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ 分别为394.3, 415.3和458.8℃; PA66/KBF-B的 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ 分别为382.5, 407.5℃和458.2℃; PA66/KBF-P的 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ 分别为390.4, 410.4℃和455.5℃。其中,PA66/KBF复合材料的热稳定性更佳,而PA66/KBF-P失重开始时的热稳定性优于PA66/KBF-B,之后逐渐低于PA66/KBF-B。

由图8可看出,4种复合材料拥有相近的玻璃化转变温度(T_g)。随着温度的升高,在455℃左右PA66/BF复合材料即开始出现明显的分解放热焓;



—纯BF; —KBF; - -KBF-B; - -KBF-P

图7 PA66/BF复合材料的TG曲线



—纯BF; —KBF; - -KBF-B; - -KBF-P

图8 PA66/BF复合材料的DSC曲线

表2 纤维质量分数20%时PA66/BF复合材料的TG

BF 种类	$T_5\%$ / °C	$T_{10\%}$ / °C	$T_{50\%}$ / °C
纯 BF	348.8	396.4	455.0
KBF	394.3	415.3	458.8
KBF-B	382.5	407.5	458.2
KBF-P	390.4	410.4	455.5

而另3种纤维的复合材料的 T_g 有所提高,而且放热峰的面积相对PA66/BF复合材料明显减小,这也说明改性后复合材料的热稳定性有所提高。

3 结论

(1) BF的氨基化能带来PA66基复合材料力学性能的提升,非异氰酸酯聚氨酯-BF杂化改性后的复合材料力学性能得到进一步改善。

(2) 随着KBF-B含量的增加,PA66/KBF-B复合材料的拉伸性能、弯曲性能和无缺口冲击性能均得到有效提高。

(3) 相同纤维含量时,PA66/KBF-B的力学性能优于PA66/玻璃纤维复合材料。

(4) 非异氰酸酯聚氨酯-BF的杂化改性能降低PA66的吸水率并提高复合材料的热稳定性。

参考文献

- [1] 陈鹏,张谋虎,王成勇,等.玄武岩纤维主要特性研究现状[J].无机盐工业,2020,52(10):64-67.
Chen Peng, Zhang Chenhu, Wang Chengyong, et al. Research status of main properties of basalt fiber[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(10):64-67.
- [2] Jamshaid H, Mishra R. A green material from rock:basalt fiber—a review[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107(7):923-937.
- [3] Fiore V, Scalici T, Bella G D, et al. A review on basalt fiber and its composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2015(74):74-94.
- [4] 杨莉,吴宜城,沈城伟.玄武岩纤维的性能及应用[J].成都纺织高等专科学校学报,2016,33(1):132-135.
Yang Li, Wu Yicheng, Shen Chengwei. The performance and application of basalt fiber[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2016, 33(1):132-135.
- [5] 张晓青,冯静,王仁舒,等.玄武岩纤维的研究进展及应用[J].山东化工,2019,48(4):46-47.
Zhang Xiaoqing, Feng Jing, Wang Renshu, et al. Research progress and application of basalt fiber[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(4):46-47.
- [6] 荀万,周绿山,邓远方,等.玄武岩纤维在建筑材料领域的应用研究进展[J].当代化工,2019,48(5):1 083-1 086.
Gou Wan, Zhou Lyushan, Deng Yuanfang, et al. Research progress in application of basalt fiber in the building material field[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(5):1 083-1 086.
- [7] 方华扬.聚酰胺-66的研究与综述[J].当代化工研究,2017(1):8-9.
Fang Huayang. Study and summary of polyamide-66[J]. Chemical Intermediate, 2017(1):8-9.
- [8] 贾娟花.尼龙66的增强改性及耐水解性能的研究[D].北京:北京化工大学,2006.
Jia Juanhua. Study on reinforcing and modifying of nylon66 and its properties of hydrolyzing resistance[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [9] 李跃文.玻璃纤维增强尼龙66改性研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2017(3):96-100.
Li Yuewen. Advane of improvement research of glass fiber reinforced polyamide 66[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(3):96-100.
- [10] 董建勋,何泽涵,杨光杰,等.我国尼龙6和尼龙66发展研究[J].能源与环保,2018,40(6):162-164.
Dong Jianxun, He Zehan, Yang Guangjie, et al. Study on development of nylon 6 and nylon 66 in China[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(6):162-164.
- [11] 郑素萍,王从科,张霞,等.尼龙66吸水性测试的研究[J].计量与测试技术,2019,46(1):28-29.

- Zhen Suping, Wang Congke, Zhang Xia, et al. Investigation on the water absorption determination of nylon 66[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(1):28-29.
- [12] 林星五, 李灿浩, 王麦见, 等. 纤维增强尼龙复合材料研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(13):69-71.
- Lin Xingwu, Li Canhao, Wang Maijian, et al. Research of fiber reinforced nylon66 composites[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(13):69-71.
- [13] 刘学慧. 连续玄武岩纤维与碳纤维、芳纶、玻璃纤维的对比及其特性概述[J]. 山西科技, 2014, 29(1):87-90.
- Liu Xuehui. Comparison of continuous basalt fiber with carbon fiber, aramid fiber and glass fiber and overview of their characteristics[J]. Shanxi Science and Technology, 2014, 29(1):87-90.
- [14] 曲日华, 王立岩, 张龙云, 等. 玻璃纤维增强尼龙 66 复合材料的结构与性能[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(1):27-31.
- Qu Rihua, Wang Liyan, Zhang Longyun, et al. Structure and performance of glass fiber reinforced nylon 66 composite[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(1):27-31.
- [15] 甘舟, 曹海琳, 晏义伍, 等. 碳纤维-Ni/尼龙 66 复合材料的制备与性能表征[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5):945-951.
- Gan Zhou, Cao Hailin, Yan Yiwu, et al. Preparation and properties of carbon fiber-Ni / nylon 66 composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5):945-951.
- [16] 田文伟. 尼龙/芳纶纤维复合材料的制备及其研究[D]. 海口: 海南大学, 2012.
- Tian Wenwei. Preparation and study of nylon / kevlar fiber composites[D]. Haikou: Hainan University, 2012.
- [17] 王正宏, 张敏, 黄宁选, 等. 尼龙 66 改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(1):121-125.
- Wang Zhenghong, Zhang Min, Huang Ningxuan, et al. Research progress on modification of nylon 66[J]. Engineering Plastics Applications, 2014, 42(1):121-125.
- [18] 戴家桐. 短玻纤增强尼龙 66 复合材料的制造方法及比较[J]. 国外塑料, 2013, 31(6):41-43.
- Dai Jiatong. The manufacturing method and comparison of short glass fiber reinforced nylon 66 composite[J]. World Plastics, 2013, 31(6):41-43.
- [19] 王晓东, 云斯宁, 张太宏, 等. 硅烷偶联剂表面改性玄武岩纤维增强复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5):77-83.
- Wang Xiaodong, Yun Sining, Zhang Taihong, et al. Advances in basalt fiber-reinforced composites modified by silane coupling agents[J]. Materials Reports, 2017, 31(5):77-83.
- [20] 冯月兰, 赵雨花, 张清运, 等. 从 CO₂ 出发合成环状碳酸酯及杂化非异氰酸酯聚氨酯[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18(2):28-32.
- Feng Yuelan, Zhao Yuhua, Zhang Qingyun, et al. Synthesis of cyclic carbonate and hybrid non-isocyanate polyurethane from CO₂[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2020, 18(2):28-32.
- [21] 宋波, 秦安军, 唐本忠. 绿色单体二氧化碳参与的新型聚合反应[J]. 化学学报, 2020, 78(1):9-22.
- Song Bo, Qin Anjun, Tang Benzong. New polymerizations based on green monomer of carbon dioxide[J]. Acta Chimica Sinica, 2020, 78(1):9-22.
- [22] 高志文, 肖林飞, 陈静, 等. 二氧化碳与环氧化物合成环状碳酸酯的研究进展[J]. 催化学报, 2008(9):831-838.
- Gao Zhiwen, Xiao Linfei, Chen Jing, et al. Recent advances in the synthesis of cyclic carbonates from carbon dioxide and epoxides[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2008(9):831-838.
- [23] Ghanbaralizadeh R, Bouhendi H, KabiriK, et al. A novel method for toughening epoxy resin through CO₂ fixation reaction[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2016, 16 :225-235.
- [24] 刘佳, 姚光晔. 硅烷偶联剂的水解工艺研究[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(4):60-63.
- Liu Jia, Yao Guangye. Research on hydrolysis process of silane coupling agent[J]. China Powder Science and Technology, 2014, 20(4):60-63.
- [25] 董金美, 李颖, 文静, 等. KH550 硅烷偶联剂的水解工艺研究[J]. 盐湖研究, 2020, 28(3):28-33.
- Dong Jinmei, Li Ying, Wen Jing, et al. Study on Hydrolysis Process of KH550 silane coupling agent[J]. Journal of Salt Lake Research, 2020, 28(3):28-33.
- [26] Ke Jiexi, Li Xiaoyun, Wang Feng, et al. Non-isocyanate polyurethane / epoxy hybrid materials with different and controlled architectures prepared from a CO₂-sourced monomer and epoxy via an environmentally-friendly route[J]. RSC Advances, 2017, 7(46):28 841-28 852.
- [27] 李晖, 魏莉萍, 王湘明, 等. 吸水率对尼龙 66 力学性能的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(8):64-67.
- Li Hui, Wei Liping, Wang Xiangming, et al. Investigation on the influences of water absorption to the mechanical properties of nylon 66 materials[J]. Engineering Plastics Applications, 2008, 36(8):64-67.